

DAS OSSIFIKATIONSPRINZIP
DES KEHLKOPFSKELETS

Radiologisch-topographische
und mechanische Untersuchungen

von

Wolfgang von Glaß

aus

Nürnberg



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546222_0042

Aus dem Pathologischen Institut
der Universität Erlangen-Nürnberg
Direktor: Prof. Dr. V. Becker

DAS OSSIFIKATIONSPRINZIP DES KEHLKOPFSKELETS

Radiologisch-topographische
und mechanische Untersuchungen

INAUGURAL – DISSERTATION

zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Friedrich - Alexander - Universität
Erlangen-Nürnberg

vorgelegt
von
Wolfgang von Glaß
aus
Nürnberg

Gedruckt mit Erlaubnis der Medizinischen Fakultät
der Universität Erlangen-Nürnberg

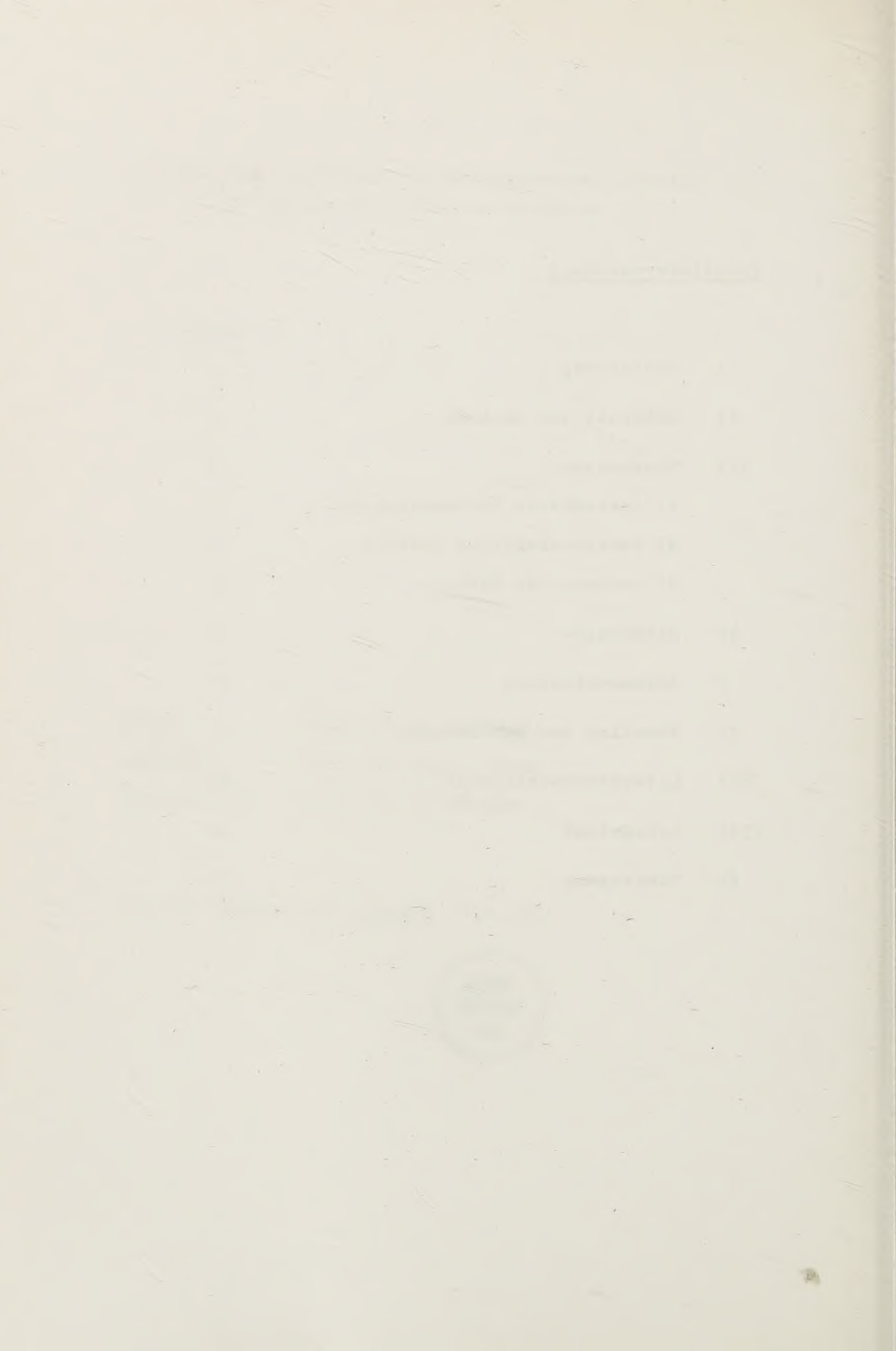
Dekan: Prof. Dr. W. Kersten
Referent: Prof. Dr. H.-J. Pesch
Korreferent: Prof. Dr. V. Becker

Tag der mündlichen Prüfung: 27.7.1981



Inhaltsverzeichnis

	Seite
I Einleitung	1
II Material und Methode	2
III Ergebnisse	4
1) Anatomische Vorbemerkungen	4
2) Röntgenologische Befunde	5
3) Mechanische Befunde	6
IV Diskussion	8
V Zusammenfassung	15
VI Tabellen und Abbildungen	17
VII Literaturverzeichnis	29
VIII Lebenslauf	32
IX Danksagung	33



Einleitung

Die Kehlkopfknorpel des Menschen verknöchern physiologischer Weise nach einem typischen Muster, das trotz individueller Abweichungen recht konstant ist (CHIEVITZ, 1882; FRÄNKEL, 1908; SCHEIER, 1910; CHAMBERLAIN, 1935; RONCALLO, 1948; HEYWANG, 1950; HATELY, 1965; BUGYI, 1968). Die Verknöcherung beginnt zwischen dem 15. und 20. Lebensjahr. Die quantitative Ausprägung ist von Alter und Geschlecht abhängig (CHIEVITZ, 1882; SCHEIER, 1910; RONCALLO, 1948; CHAMBERLAIN, 1935; HEYWANG, 1950; HATELY, 1965). Hormonelle Einflüsse wie bei Hypothyreose und Menopause sollen die Verknöcherung beschleunigen (BUGYI, 1968). Bei einer ausgeprägten Struma soll die Verknöcherung wegen der geringeren Beweglichkeit des Kehlkopfes ein geringeres Ausmaß erreichen (HEYWANG, 1950). Auch bei verschiedenen Säugetieren wurde eine Verknöcherung der Kehlkopfknorpel beschrieben (FRIEDRICH, 1916; BEJSOVEC, 1954; SCHNEIDER, 1963).

Als Ursache für die Verknöcherung wurde ein Zusammenhang mit den Ansätzen der Muskeln und Bänder am Kehlkopf vermutet (SCHEIER, 1910). Letztlich ist die Ätiologie jedoch ungeklärt.

Zur Frage des Einflusses eines übergeordneten physikalisch-biologischen Prinzips wurden das Verknöcherungsmuster des Kehlkopfes röntgenologisch und die Verformung des Kehlkopfskelets durch die Kehlkopfeigene Muskulatur experimentell mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen untersucht. Die röntgenologischen und mechanischen Befunde wurden miteinander verglichen.

Material und Methode

Bei 94 Verstorbenen beiderlei Geschlechts im Alter von 15 bis 79 Jahren (Tab. 1) wurde nach Ausschluß Kehlkopfeigener Erkrankungen und nach Entfernung der Weichteile das Kehlkopfskelet als Ganzes und der an der Incisura mediana halbierte Schildknorpel mit 35 kV 1 Minute lang geröntgt.

Ferner wurden von den formalinfixierten Kehlköpfen je eines 16- und 72-jährigen männlichen Verstorbenen sämtliche Weichteile, die Epiglottis und die Stellknorpel unter Erhaltung des Cricothyreoidgelenks entfernt. Auf die Thyreoidvorderflächen wurden bei beiden Kehlköpfen auf der linken Seite drei 60° R o s e t - t e n - Dehnungsmeßstreifen¹, bei dem 72 Jährigen zusätzlich noch auf der rechten Seite drei E i n z e l - Dehnungsmeßstreifen¹ mit schnellhärtendem Cyanoacrylkleber² befestigt (Abb. 1 und 2).

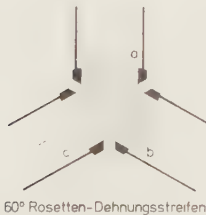
Außerdem wurden auf die Ansatzflächen des M. laryngopharyngicus am Thyreoid zwei Gummistreifen aufgeklebt und dorsal so miteinander verbunden, daß durch Zug an diesen Streifen die mechanische Einwirkung des M. laryngopharyngicus auf den Kehlkopf beim Schluckakt imitiert werden konnte. Zur Durchführung dieser Belastungsversuche wurden die beiden Kehlköpfe in ein Stativ eingespannt (Abb. 2). Durch Drehen der an der Hinterseite des Stativs angebrachten Schraube und der damit bedingten Spannung der Gummibänder wurden die Kehlköpfe in jeweils 10 aufsteigenden Belastungsstufen

¹Firma Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH, Darmstadt

²Firma Delo München

(eine Belastungsstufe entspricht einer halben Schraubendrehung) komprimiert. Dabei wurde mit Hilfe einer Wheatstoneschen Brückenschaltung und eines Meßverstärkers¹ die Verformung der Thyreoidoberfläche bestimmt. Aus den ermittelten Meßwerten wurden Größe und Lage der beiden aufeinander senkrecht stehenden Hauptdehnungen (ϵ_1 und ϵ_2) berechnet (KEIL, 1972).

Ein Dehnungsmeßstreifen ist ein Kunststoffplättchen, das fest mit der zu dehnenden Fläche verbunden wird und auf dessen Außenseite ein feiner, in engen Serpentin gewundener, elektrischer Leiter angebracht ist. Die Länge dieses Leiters ist proportional zu seinem Widerstand: bei Dehnung dieses Leiters steigt somit der Widerstand. Die Dehnungen der einzelnen Serpentinwindungen addieren sich zu einer meßtechnisch auswertbaren Gesamtwiderstandsänderung. Diese Widerstandsänderung kann mit Hilfe einer Wheatstoneschen Brückenschaltung gemessen und daraus wiederum die Größe der Dehnung bestimmt werden (BENNING, 1954; HOFFMANN, 1976).



Zur Bestimmung von Richtung und Größe eines unbee-kannten ebenen Dehnungszustandes werden Rosetten-Dehnungsmeßstreifen verwendet, die aus drei im 60° Winkel rosettenförmig angeordneten Meßstreifen (a,b,c) bestehen. Aus den mit dieser Rosette gewonnenen Meßwerten (ϵ_a , ϵ_b , ϵ_c) können die Größe der beiden Hauptdehnungen ϵ_1 und ϵ_2 und deren Lage zur Rosette berechnet werden (KEIL, 1972).

Einzel-Dehnungsmeßstreifen dienen dagegen dazu, die Größe eines seiner Lage nach bekannten ebenen Dehnungszustands zu bestimmen.

¹Meßverstärker KWS 3050, Firma Hottinger Baldwin

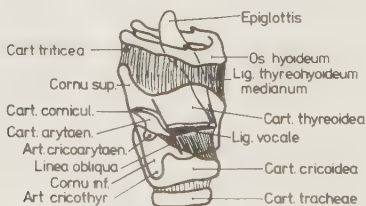
Ergebnisse

Zum Verständnis der Ergebnisse sind einige anatomische Vorbemerkungen notwendig.

Das Skelet des Kehlkopfs umfaßt den Ringknorpel, die zwei Stellknorpel, den Schildknorpel, den Kehlideckel, die Cartt. corniculatae und die fakultativ vorkommenden Cartt. triticeae (PERNKOPF, 1952; BENNINGHOFF, 1954; v. LANZ, 1955; ROHEN, 1975).

Der Ringknorpel (Cart. cricoidea) hat die Form eines Siegelrings, dessen Siegel als Fläche (Lamina) nach hinten und dessen Bogen (Anulus) nach vorne gerichtet ist. Die beiden Stellknorpel (Cartt. arytaenoideae) sitzen dem Ringknorpel hinten-oben auf und bilden mit diesem die beiden Cricothyroidgelenke. Die Stellknorpel haben die Form einer dreiseitigen Pyramide: nach vorne den Processus vocalis, nach lateral den Processus muscularis und nach oben den Apex. Auf dem Apex sitzen die Cartt. corniculatae auf.

Der Schildknorpel (Cart. thyreoidea) besteht aus zwei fünfeckigen Platten (Laminae cart. thyreoideae), die sich medial im spitzen Winkel treffen und lateral in ein oberes (Cornu superius) und ein unteres Horn (Cornu inferius) auslaufen. Die beiden unteren Hörner bilden mit dem Ringknorpel die Cricothyroidgelenke. Schräg von lateral-kranial nach medial-kaudal läuft über die Laminae auf



Kehlkopfskelet (modifiziert nach ROHEN, 1975)

der Ventralseite eine Knorpelleiste, Linea obliqua, die einen wichtigen Muskelansatz darstellt. Der Kehlideckel (Epiglottis) und die Spitze des Proc. vocalis der Stellknorpel bestehen aus elastischem, alle anderen Teile des Kehlkopfskeletts primär aus hyalinem Knorpel.

Röntgenologische Befunde

Die Verknöcherung des Kehlkopfes beginnt zwischen dem 15. und 20. Lebensjahr. Sie tritt bei der Frau etwas später als beim Mann auf. Im Ring- und Schildknorpel bilden sich etwa gleichzeitig, in den Stellknorpeln erst danach Knochenkerne. (Wegen der geringen Fallzahl bei 15 - 20 Jährigen ist eine verbindliche Aussage zum Verknöcherungsbeginn weder in den einzelnen Knorpeln noch bei den Geschlechtern möglich.)

Die Verknöcherung des Ringknorpels (Abb. 3 und 4) beginnt beiderseits in der Nähe des Cricarytaenoidgelenks und breitet sich von dort über den Oberrand des Anulus und über die Lamina aus. Bei stark verknöcherten Kehlköpfen können die beiden Knochenmassen in der Mitte der Lamina verschmolzen sein. Der Unterrand des Anulus verknöchert nur in Ausnahmefällen.

Die Verknöcherung der Stellknorpel (Abb. 4) beginnt im Processus muscularis und breitet sich in Richtung Apex aus. Der Processus vocalis verknöchert nicht.

Die Verknöcherung des Schildknorpels (Abb. 3 und 5) beginnt lateral-kaudal. Von dort aus schreitet sie entlang des lateralen Randes nach kranial-kaudal und gleichzeitig entlang des kaudalen Randes nach medial fort (Abb. 5a und b). Zusätzlich bildet sich im Angulus thyreoideus ein Knochenkern (Abb. 5b und c). Außerdem breitet sich die Verknöcherung vom kaudalen Rand schräg-zungenförmig nach kranial-medial aus (Abb. 5b und c). Schließlich ist der Schildknorpel auf typische Weise in vier Vorzugsrichtungen entlang seiner kaudalen und lateralen Kante einschließlich der Hörner, am Angulus thyreoideus und schräg zungen-

förmig auf den Platten verknöchert (Abb. 5c und d). Häufig bleiben zwischen den verknöcherten Anteilen nur mehr zwei kleine Knorpelinseln auf den Platten übrig, manchmal ist der Schildknorpel vollkommen verknöchert. Eine schwerwiegende Abweichung des Verknöcherungsmusters des Schildknorpels zwischen Mann und Frau ist nicht feststellbar (Abb. 5c und d). Lediglich bei vier der 38 untersuchten weiblichen Kehlköpfe waren die beiden Verknöcherungsrichtungen schräg über die Lamina und entlang des lateralen Randes verschmolzen.

Eine Verknöcherung der *C a r t t . t r i t i c e a e* findet sich, wenn der laterale Rand inclusive Cornu superius des Schildknorpels verknöchert ist.

Die *E p i g l o t t i s* und die *C a r t t . c o r n i c u l a t a e* verknöchern nie.

M e c h a n i s c h e B e f u n d e

Die Ergebnisse der Belastungsversuche zur Verformung des Thyreoids beim Schluckakt durch den *M. laryngopharyngicus* stimmen bei beiden Kehlköpfen hinsichtlich der *R i c h t u n g* der Hauptdehnungen überein. Die größte *D e h n u n g* fand sich bei beiden Kehlköpfen an der kaudalen Kante, eine geringe auf der Lamina und am lateralen Rand. Die Hauptdehnung *E₁* erstreckt sich am kaudalen Rand von lateral nach medial, am lateralen Rand von kaudal nach kranial (Abb. 6). Am kaudalen Rand ist sie nahezu doppelt so groß wie am lateralen (Tab. 2).

An den Meßstellen aller Rosetten- und Einzeldehnungsmeßstreifen stieg die Größe der Dehnung linear mit den Belastungsstufen an (Abb. 7 und 8). Beim knorpeligen, noch unverknöcherten Kehlkopf des 16 Jährigen steigt die Hauptdehnung ϵ_1 an der kaudalen Kante linear von 145 $\mu\text{m/m}$ bis 601 $\mu\text{m/m}$ an. Die senkrecht dazu stehende Hauptdehnung ϵ_2 fällt von -2 $\mu\text{m/m}$ auf -128 $\mu\text{m/m}$ (Tab. 2, Abb. 9). Beim verknöcherten Kehlkopf des 72 Jährigen steigt die Hauptdehnung ϵ_1 an der kaudalen Kante von 31 $\mu\text{m/m}$ bis zu 642 $\mu\text{m/m}$ linear an, während die Hauptdehnung ϵ_2 um Null schwankt (Tab. 2). Beim Kehlkopf des 16 Jährigen (Tab. 2, Abb. 6) ist die Hauptdehnung ϵ_1 an der Meßstelle der Rosette A (m e d i a l der Linea obliqua) etwa doppelt so groß wie die Hauptdehnung ϵ_1 an der Meßstelle der Rosette B (l a t e r a l der Linea obliqua). Beim Kehlkopf des 72 Jährigen wurde der unmittelbar lateral an der Linea obliqua gelegene Einzel-Dehnungsmeßstreifen A am stärksten, die weiter medial gelegenen B und C weniger bzw. fast überhaupt nicht gedehnt (Tab. 3, Abb. 6).

Diskussion

Das röntgenologisch ermittelte Verknöcherungsmuster der Kehlkopfknorpel stimmt beim männlichen und weiblichen Geschlecht überein, wenngleich die Verknöcherung bei der Frau im allgemeinen weniger ausgeprägt ist. Diese Befunde korrelieren mit früheren Untersuchungen (CHIEVITZ, 1882; FRÄNKEL, 1908; SCHEIER, 1910; CHAMBERLAIN, 1935; RONCALLO, 1948; HEYWANG, 1950; HATELY, 1965; BUGYI, 1968). Sie gelten auch für das Thyreoid, das nach CHIEVITZ (1882) und SCHEIER (1910) beim weiblichen Geschlecht vom lateralen Rand bis auf die Lamina verknöchert. Da dieser Befund hier jedoch nur in vier von 38 Fällen erhoben werden konnte, ist er eher als Normvariante zu interpretieren, wobei die Verknöcherungsrichtung entlang des lateralen Randes mit der schräg über die Lamina verlaufenden verschmolzen ist. Mit Hilfe der Dehnungsmeßstreifen wurde der ebene Verformungszustand auf der Oberfläche des Thyreoids bestimmt, der beim Schluckakt durch den M. laryngopharyngicus hervorgerufen wird.

Ein ebener Verformungszustand wird durch die beiden aufeinander senkrecht stehenden Hauptdehnungen E_1 und E_2 und deren Lage auf der Oberfläche beschrieben. E_1 gibt den Wert der größten, E_2 den der geringsten Dehnung an. Die Dehnung E_φ in beliebiger Richtung läßt sich aus E_1 und E_2 nach der Formel

$$E_\varphi = \frac{E_1 + E_2}{2} + \frac{E_1 - E_2}{2} \cos 2\varphi \text{ berechnen,}$$

wobei φ der Winkel ist, den E_φ mit E_1 einnimmt. E_1 und E_2 können sowohl positives als auch negatives Vorzeichen annehmen (FALK, 1969; NEUBER, 1971; MEYER ZUR CAPELLEN, 1974; KEIL, 1972).

Im Versuch stieg die Hauptdehnung ϵ_1 sowohl beim knorpeligen als auch beim verknöcherten Kehlkopf linear mit der Belastung an. Dabei ist nur das Verhalten des einzelnen Kehlkopfes bei den Belastungsstufen vergleichbar, da die Absolutwerte der Dehnungen von einer Vielzahl von Faktoren wie zum Beispiel Fixierung, Feuchtigkeit des Gewebes und anderen äußeren Faktoren abhängen. Nach Abbruch der Belastung kehrte sowohl das knorpelige als auch verknöcherte Thyreoid jeweils zu seiner Ausgangslänge zurück, verhielt sich also elastisch.

Bei der Verformung des Schildknorpels unter dem Schluckakt trat an der kaudalen Kante beim unvernöcherten Thyreoid ein ungleichsinnig, zweiachsiger Spannungszustand (ϵ_1 positiv, ϵ_2 negativ) auf, der sich auf die Dauerfestigkeit vermindern auswirkt (SIGWART, 1974). Dieser Spannungszustand fehlte im Gegensatz dazu an der kaudalen Kante des verknöcherten Thyreoids, so daß auf Grund der Verknöcherung die Festigkeit gegenüber einer Dauerbelastung erhöht worden ist.

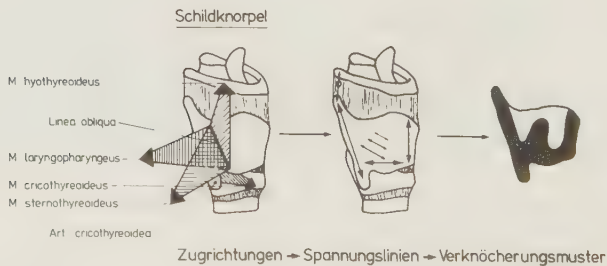
Der Vergleich der mit den Rosetten- und Einzeldehnungsmeßstreifen an den verschiedenen Meßstellen des Thyreoids gewonnenen mechanischen Ergebnissen ergibt, daß der Schildknorpel beim Schluckakt am meisten parallel seiner kaudalen Kante gedehnt wird, während die Verformung auf der Lamina und an den Cornua deutlich geringer ist. Diese mechanische Hauptdehnungsrichtung entlang der kaudalen Kante des Thyreoids stimmt mit der röntgenologischen Hauptverknöcherungsrichtung überein. Entsprechend der von lateral nach medial deutlichen Abnahme der Größe der Dehnung beginnt die Verknöcherung lateral und schreitet dann langsam nach medial zu fort.

Damit besteht der experimentelle Nachweis der Übereinstimmung zwischen einer Hauptverknöcherungsrichtung und der durch den M. laryngopharyngicus hervorgerufenen Verformung.

Auf Grund dieses Nachweises lassen sich unschwer durch Analogieschlüsse ähnliche muskuläre Einflüsse auf die anderen Hauptverknöcherungsrichtungen anstellen (siehe unten⁺).

Der M. sternothyreoideus und der M. hyothyreoideus setzen an der Linea obliqua des Thyreoids an und bewirken die vertikalen Bewegungen des gesamten Kehlkopfs in seinem venteralen Gleitraum (v. LANZ, 1955; ROHEN, 1975). Beim Zug des M. sternothyreoideus nach kaudal werden das kräftige Lig. thyreo-hyoideum medianum und die Ligg. thyreo-hyoidea laterales, beim Zug des M. hyothyreoideus nach kranial die Trachea gespannt. Beim Wechselspiel dieser beiden antagonistischen Muskeln werden Verformungskräfte in Verlängerung der vertikalen Zugrichtung obengenannter Bänder entlang des lateralen Randes inklusive der Cornua und entlang des Angulus thyreoideus auf den Schildknorpel übertragen. Der Verlauf dieser Spannungsrichtungen stimmt mit den beiden Hauptverknöcherungsrichtungen

+



entlang des lateralen Randes inklusive der Cornua und entlang des Angulus thyreoideus überein. Der M. sternothyreoideus bewirkt außerdem eine Kippung des Thyreoids in Bezug zum Cricoid nach dorsal, da der Hauptteil seiner Fasern dorsal der Achse des Cricothyreoidgelenkes liegt. Dabei besitzen die kranial ansetzenden Muskelfasern den günstigeren Hebelarm (ROHEN, 1975). Als Antagonist wirkt der M. cricothyreoideus, der mit seiner Pars lateralis am unteren Horn und seiner Pars medialis am kaudalen Rand des Thyreoids ansetzt. Er führt zu einer Kippung des Thyreoids nach ventral, wobei die Pars medialis den günstigeren Hebelarm besitzt (ROHEN, 1975). Beim Wechselspiel dieser Muskeln treten im Bereich eines schräg-zungenförmig von kaudal-lateral nach kranial-medial über die Laminae des Thyreoids laufenden Streifens senkrecht dazu stehende Zugspannungen auf, die kaudal am größten sind. Dieser Bereich stimmt mit der Form der zungenförmigen Hauptverknöcherungsrichtung auf den Laminae überein.

Am Ringknorpel entspringen an der Dorsalfläche der M. cricoarytaenoideus posterior (Postikus) und am kranial-lateralen Rand des Anulus der M. cricoarytaenoideus lateralis (Lateralis), die am Proc. muscularis des Schildknorpels ansetzen. Da sie als Antagonisten wirken, entstehen durch ihr Wechselspiel sowohl an ihren Ansatzflächen als auch zwischen diesen Flächen Zugspannungen. Der Verlauf dieser Spannungslinien stimmt mit dem Verknöcherungsmuster des Cricoids überein.

Außerdem setzen am Ringknorpel mit wenigen Muskelfasern die Pars cricopharyngea des M. laryngopharyngicus und ohne unmittelbaren Antagonisten der M. cricothyreoideus an. Sie üben keine nennenswerten Verformungskräfte auf das Cricoid aus.

Beim Zug des gesamten Kehlkopfs nach kranial treten im Ringknorpel in vertikaler Richtung nur geringe Spannungen auf, da die Trachea in Längsrichtung wegen der in den Ligg. anularia scherengitterartig angeordneten, kollagenelastischen Faserbündel leicht dehnbar ist (ROHM, 1975). Daher kommt es zu keiner nennenswerten Verformung des Unterrandes des Cricoids, der im Allgemeinen nicht verknöchert.

An den *Sticllknorpeln* setzen am Proc. muscularis der M. cricoarytaenoideus lateralis et posterior und der M. thyreoarytaenoideus lateralis, an der lateralen Kante und an der Dorsalfläche der M. arytaenoideus transversus an. Im Bereich dieser Ansatzstellen treten beim Wechselspiel dieser Muskeln Zugspannungen auf. Diese Areale sind verknöchert, der Processus vocalis dagegen nicht. Die aus elastischen Knorpel bestehende Spitze des Proc. vocalis und das aus elastischen Fasern aufgebaute Stimmband geben einer Verformung nahezu widerstandslos nach.

Die Verknöcherung des Kehlkopfs beginnt beim jungen Erwachsenen mit Abschluß des Kehlkopfwachstums. Dieser Verknöcherungsprozeß schreitet dann über Jahrzehnte hinweg fort (STEPHAN et al., 1981). Bei extremer mechanischer Belastung, wie beim Stridor congenitus, kann der Kehlkopf jedoch auch schon beim Säugling verknöchert sein (GOLDBLOOM, 1960). Der Reiz für die Verknöcherung ist eine wechselnde Dauerbelastung durch Dehnung (PESCH et al., 1980 b), wie sie ständig beim Schluckakt, bei der Stimmbildung und bei Bewegungen von Kopf und Hals auftritt. Im Bereich der größten Dehnungsbeanspruchung tritt die Verknöcherung zuerst auf. Dies ist am Thyreoid die Stelle, an der sich die entlang der lateralen und kaudalen Kante laufenden Spannungslinien kreuzen. Bei geringerer Verformung tritt die Verknöcherung später auf.

Der verknöcherte Kehlkopf besteht aus lamellärer Spongiosa mit Aufbau eines trajektoriiellen Trabekelsystems (SCHEIER, 1910). Bei Minderung oder Fortfall der mechanischen Belastung, wie zum Beispiel bei Rekurrenslähmung, kommt es in den Stellknorpeln zu einem Verlust des Trabekelsystems unter Abbau des Knochens (MIEHLKE, 1957). Da jedoch im Normalfall das Kehlkopfskelet lebenslang gleichbleibend verformt wird, baut sich der Knochen auch im hohen Alter nicht ab (STEPHAN et al., 1981). Damit unterscheidet sich das Kehlkopfskelet wesentlich von fast allen anderen Knochen des menschlichen Körpers, in denen die Knochenmasse altersabhängig abnimmt (PESCH et al., 1977; PESCH et al., 1980 c).

Auch bei verschiedenen Säugetieren, zum Beispiel beim Pferd (FRIEDRICH, 1916) und beim Rehbock (BEJSOVEC, 1954), verknöchern die Kehlkopfknorpel nach einem typischen Muster. Die Ausgestaltung dieser Muster differiert jeweils nach den besonderen, physiologischen und anatomischen Gegebenheiten der jeweiligen Species, ist aber innerhalb einer Art, genauso wie beim Menschen konstant.

Das Verknöcherungsmuster des Kehlkopfs ist Ausdruck seiner mechanischen Belastung und entspricht der durch die kehlkopfeigene Muskulatur hervorgerufenen Verformung des Kehlkopfskelets. Die Verknöcherung führt durch Erhöhung des E-Moduls zur Versteifung des Stützgewebes und dient damit der Sicherung der anatomischen Konstruktion (PESCH et al., 1981). Sie ist ein Beispiel für selbstgesteuerte Anpassung des Binde- und Stützgewebes an mechanische Belastungen (PAUWELS, 1965).

Ähnliche physiologisch-adaptative Prozesse liegen bei der Ossifikation der Trachealknorpel vor, die

durch Biegung ständig Zug- und Druckkräften ausgesetzt sind (PESCH et al., 1980 a). Auf Grund der unterschiedlichen, anatomischen Konstruktion von Kehlkopf und Trachea und der davon abhängigen differentiellen Verformung sind die Ossifikationsmuster beider Organe verschieden.

Zusammenfassung

Bei 94 Verstorbenen beiderlei Geschlechts im Alter von 15 bis 79 Jahren ohne Kehlkopfeigene Erkrankungen wurde nach Entfernung der Weichteile das Kehlkopfskelet zur Darstellung der Verknöcherungsvorgänge *g e r ö n t g t* . Ferner wurde die beim Schluckakt durch den *M. laryngopharyngicus* am Kehlkopf bewirkte Verformung des Schildknorpels *e x p e r i m e n t e l l* imitiert und mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen bestimmt.

Die Ossifikation beginnt zwischen dem 15. und 20. Lebensjahr. Sie tritt bei der Frau etwas später als beim Mann auf. Im Ring- und Schildknorpel bilden sich etwa gleichzeitig, in den Stellknorpeln erst danach Knochenkerne. Der Ringknorpel verknöchert an der Lamina und am Oberrand des Anulus. Die Stellknorpel verknöchern am *Processus muscularis* und am Apex. Der *Processus vocalis* verknöchert nicht. Der Schildknorpel verknöchert entlang seiner lateralen und kaudalen Kante, am *Angulus thyreoideus* und schräg zungenförmig auf den Platten. Die *Epiglottis* und *Cartt. corniculatae* verknöchern nie.

Das Thyreoid wurde beim experimentell imitierten Schluckakt parallel seiner kaudalen Kante am stärksten gedehnt. Dieser Bereich entspricht der stärksten Verknöcherung.

Das *V e r k n ö c h e r u n g s m u s t e r* des Kehlkopfskelets deckt sich mit den experimentell bzw. mit Hilfe von Analogieschlüssen ermittelten Arealen mechanisch-muskulärer Einflüsse. Als Reiz für diese

Verknöcherung wirkt die D e h n u n g , die als wechselnde Dauerbelastung beim Schluckakt, bei der Stimmbildung und bei Bewegungen im Kopf-Hals-Bereich auftritt. Diese Ossifikation orientiert sich in Vorzugsrichtungen. Sie beginnt im Bereich der größten Verformung und breitet sich dann langsam innerhalb von Jahrzehnten in Gebiete geringerer Belastung aus. Sie bewirkt durch Erhöhung des E-Moduls eine Versteifung des Stützgewebes und dient damit der Sicherung der anatomischen Konstruktion. Die Verknöcherung ist deshalb prinzipiell bei allen Säugetieren mit anatomisch-funktionell ähnlichem Kehlkopf zu erwarten.

Die V e r k n ö c h e r u n g des Kehlkopfskelets ist ein physiologisch-adaptativer Vorgang. Sie stellt ein Beispiel für die selbstgesteuerte Anpassung des Binde- und Stützgewebes an mechanische Belastungen dar.

Alter (Jahre)	Geschlecht		Σ
	♂	♀	
15 - 20	4	3	7
21 - 34	11	6	17
35 - 49	15	6	21
50 - 65	11	10	21
66 - 80	15	13	28
Σ	56	38	94

Tab. 1: Alters- und Geschlechtsverteilung der
röntgenologisch untersuchten Fälle



Abb. 1: Lage der Rosetten- und Einzel-Dehnungsmeßstreifen auf den Vorderflächen des Schildknorpels eines 16- bzw. 72-jährigen Mannes. Links Rosetten-Dehnungsmeßstreifen zur Bestimmung von Lage und Größe eines unbekannten Dehnungszustandes, rechts Einzel-Dehnungsmeßstreifen zur Ermittlung der Größe eines bekannten ebenen Dehnungszustandes (schematisch)

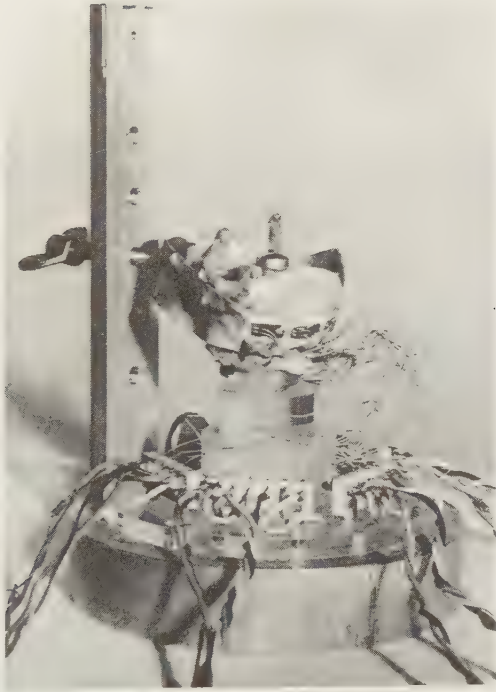


Abb. 2: Zur Durchführung von Belastungsversuchen auf ein Stativ montiertes Kehlkopfskelet eines 72-jährigen Mannes:
Schildknorpelvorderfläche rechts mit drei
E i n z e l - Dehnungsmeßstreifen und auf der
Ansatzfläche des M. laryngopharyngicus fixier-
ten Gummistreifen. An der Rückseite des Stativs
Schraube zum Spannen der Gummistreifen

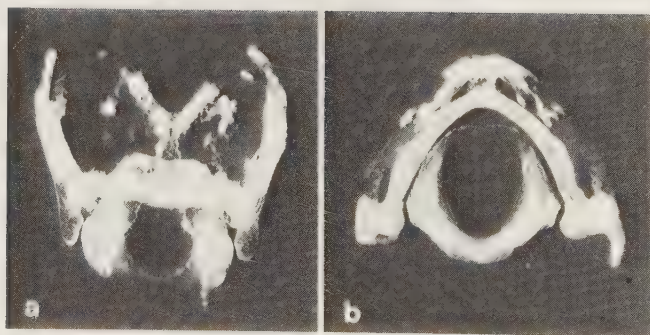


Abb. 3: Röntgenbilder des Schild- und Ringknorpels
eines 43-jährigen Mannes von:
a) ventral b) kranial (Vergr. 1x)

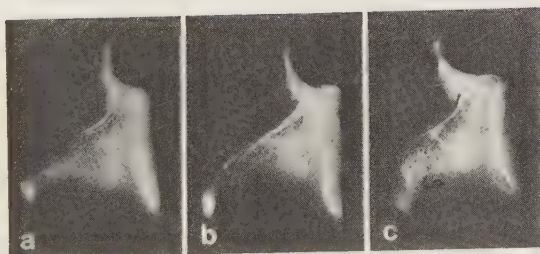


Abb. 4: Seitliche Röntgenbilder von unterschiedlich ausgeprägt verknöcherten, männlichen Ringknorpelhälften mit Stellknorpeln;

- a) 25 Jahre , gering
- b) 25 Jahre , mäßig
- c) 40 Jahre , stark verknöchert (Vergr. 1x)

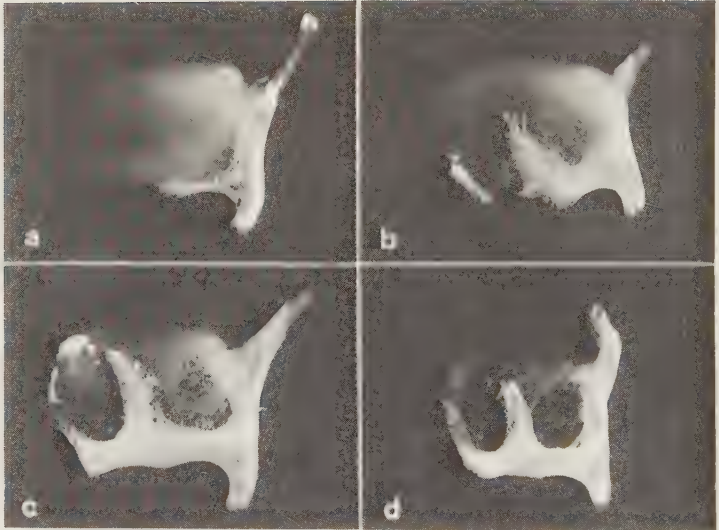


Abb. 5: Seitliche Röntgenbilder von unterschiedlich stark verknöcherten Schildknorpelhälften;

- a) 25 Jahre, männlich , gering
 - b) 32 Jahre, männlich , mäßig
 - c) 69 Jahre, männlich , stark
 - d) 78 Jahre, weiblich , stark verknöchert
- (Vergr. 1x)

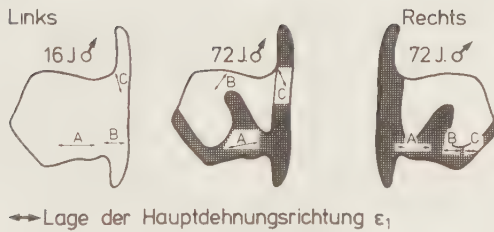


Abb. 6: Lage der Hauptdehnungsrichtung ϵ_1 an den Meßstellen A-C auf den Vorderflächen des Schildknorpels eines 16- bzw. 72-jährigen Mannes (Länge der Pfeile entspricht der relativen Größe der Hauptdehnung ϵ_1). Links Rosetten-Dehnungsmeßstreifen zur Bestimmung von Lage und Größe eines unbekannten Dehnungszustandes, rechts Einzel-Dehnungsmeßstreifen zur Ermittlung der Größe eines bekannten ebenen Dehnungszustandes (schematisch)

Belastungs- stufen	A		B		C	
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_1	ϵ_2
<u>16 J. ♂</u> 1	31	-4	10	-3	0	0
2	61	-1	22	-2	5	-2
3	121	-1	27	0	13	0
4	163	-3	34	-1	22	-2
5	259	1	50	10	41	-7
6	369	-9	64	12	70	-10
7	431	-18	85	15	90	-10
8	479	1	114	16	120	-7
9	541	6	135	19	161	-14
10	642	18	154	26	191	-18
<u>72 J. ♂</u> 1	145	-2	85	15	41	-7
2	180	-27	198	-4	69	-2
3	226	-43	186	18	70	3
4	301	-54	194	40	122	-22
5	380	-80	215	58	194	-8
6	440	-90	232	55	200	10
7	480	-97	235	58	239	8
8	520	-107	240	27	235	35
9	560	-114	241	-34	254	32
10	601	-128	262	-35	272	35

Tab. 2: Größe der Hauptdehnungen ϵ_1 und ϵ_2 [$\mu\text{m}/\text{m}$]
an den Meßstellen A-C der Rosetten-Dehnungs-
meßstreifen auf der Vorderfläche des Schild-
knorpels eines 16- bzw. 72jährigen Mannes
(1 Belastungsstufe = 1/2 Schraubendrehung)

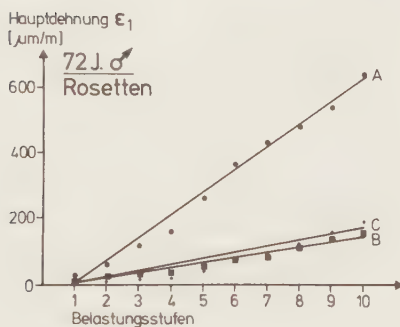
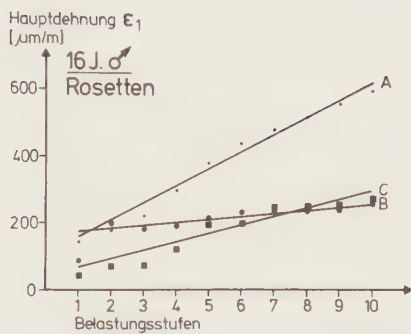


Abb. 7: Größe der Hauptdehnung ϵ_1 bei den Belastungsstufen 1-10 an den Meßstellen A-C der Rosetten-Dehnungsmeßstreifen auf den Vorderflächen des Schildknorpels eines 16- bzw. 72-jährigen Mannes

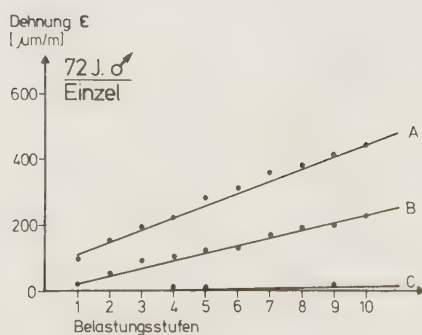


Abb. 8: Größe der Dehnung ϵ bei den Belastungsstufen 1-10 an den Meßstellen A-C der Einzel-Dehnungsmeßstreifen auf den Vorderflächen des Schildknorpels eines 72-jährigen Mannes

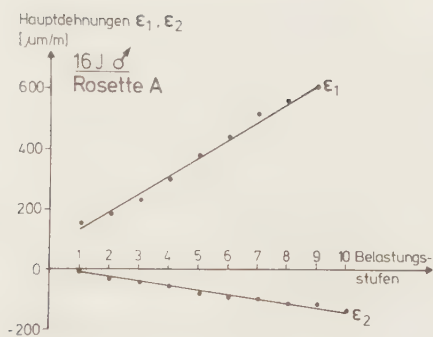


Abb. 9: Größe der Hauptdehnungen ϵ_1 und ϵ_2 an der Meßstelle des Rosetten-Dehnungsmeßstreifen A bei den Belastungsstufen 1-10 auf der linken Vorderfläche des Schildknorpels eines 16-jährigen Mannes

Belastungs- stufen		A	B	C
72 J. ♂	1	100	20	0
	2	150	50	0
	3	190	90	0
	4	220	100	10
	5	280	120	10
	6	310	130	10
	7	360	170	0
	8	380	190	0
	9	410	200	20
	10	440	230	10

Tab. 3: Größe der Dehnung ϵ [$\mu\text{m}/\text{m}$] an den Meßstellen A-C der Einzel- Dehnungsmeßstreifen auf der Vorderfläche des Schildknorpels eines 72-jährigen Mannes (1 Belastungsstufe = 1/2 Schraubendrehung)

Literaturverzeichnis

- BEJISOVEC, J.: Ossifikation des Schildknorpels beim Rehbock.
Cesskoslov. Morf. 2, 169-178 (1954)
- BENNING, O., St. KEIL:
Spannungsanalyse mit Dehnungsmeßstreifen bei elastisch-plastischen Werkstoffverformungen.
Messtechnische Briefe 10, 1-7 (1974)
- BENNINGHOFF, A.: Lehrbuch der Anatomie des Menschen.
Berlin, München 1954
- BUGYI, B.: Röntgenologischer Beitrag zur Biomorphose des Schildknorpels.
Z. Altersforschung 21, 253-258 (1968)
- CHAMBERLAIN, E., B. YOUNG:
Ossification (so-called "calcification") of normal laryngeal cartilages mistaken for foreign body.
Am. J. Roentgenology 33, 441-450 (1935)
- CHIEVITZ, J.H.: Untersuchungen über die Verknöcherung der Kehlkopfknorpel.
Arch. Anat. Physiol. 49, 303-349 (1882)
- FALK, S.: Technische Mechanik.
3. Bd. Mechanik der elastischen Körper.
Berlin 1969
- FRAENKEL, E.: Über die Verknöcherung der Kehlkopfknorpel.
Fortschr. Röntgenstr. 12, 151 (1908)
- FRIEDRICH, P.: Die Verknöcherung des Kehlkopfs und der oberen Luftröhrenknorpel des Pferdes.
Monatshefte prakt. Tierheilk. 27, 1-40 (1916)
- GOLDBLOOM, R.B.: Calcification of cartilage in the trachea and larynx in infancy associated with congenital stridor.
Pediatrics 26, 669-673 (1960)

- HATELY, W., G. EVISON, E. SAMUEL:
The pattern of ossification in the
laryngeal cartilages: a radiological study.
Brit. J. Radiol. 38, 585-591 (1965)
- HEYWANG, D.: Auftreten von Knochenkernen im Kehlkopf.
Inaugural-Dissertation Würzburg 1950
- HOFFMANN, K.: Grundlagen der Dehnungsmeßstreifen-Technik.
Firmendrucksschrift der Hottinger Baldwin
Meßtechnik GmbH Darmstadt. 1976
- KEIL, S.: Analyse ebener Spannungszustände mit
Hilfe von Dehnungsmeßstreifen. Teil 1:
Der ebene Spannungszustand.
Meßtechnische Briefe 8, 1-4 (1972).
Teil 2: Auswertung von Messungen mit DMS-
Rosetten.
Meßtechnische Briefe 8, 21-27 (1972)
- v. LANZ, T., W. WACHSMUTH:
Praktische Anatomie.
Bd. I/2 Hals. Berlin 1955
- MEYER ZUR CAPELLEN, W.:
Festigkeitslehre.
In: Dubbel, Taschenbuch für den Maschinen-
bau; Sass F., Bouche Ch., Leitner A. (eds.)
Bd. I, Berlin 1974
- MIEHLKE, A.: Über die Struktur des funktionstüchtigen
und funktionsuntüchtigen Stellknorpels.
Arch. HNO-Heilkunde 170, 435-443 (1957)
- NEUBER, H.: Technische Mechanik. Teil 2: Elastostatik
und Festigkeitslehre.
Berlin 1971
- PAUWELS, F.: Gesammelte Abhandlungen zur funktionellen
Anatomie des Bewegungsapparates.
Berlin 1965
- PERNKOPF, E.: Topographische Anatomie des Menschen. Bd. III
Wien-Innsbruck 1952
- PESCH, H.-J., F. HENSCHKE, H. SEIBOLD:
Einfluß von Mechanik und Alter auf den
Spongiosaumbau in den Lendenwirbelkörpern
und im Schenkelhals.
Virchows Archiv A Path. Anat. and Histol.
377, 27-42 (1977)

- PESCH, H.-J., Th. BOGENBERGER, L. RUDOLF, R. THULL:
Das Ossifikationsprinzip der Tracheal-
knorpel.
Verh. Dtsch. Ges. Path. 64, 571 (1980 a)
- PESCH, H.-J., C.-Ch. GÜNTHER, H.J. STRAUSS:
Die diaphysäre Verlängerungsosteotomie
an Katzenfemora.
Z. Orthop. 118, 768-780 (1980 b)
- PESCH, H.-J., H.-P. SCHARF, G. LAUER, H. SEIBOLD:
Der altersabhängige Verbundbau der Lenden-
wirbelkörper.
Virchows Archiv A Path. Anat. and Histol.
386, 21-41 (1980 c)
- PESCH, H.-J., W.v. GLASS, M. STEPHAN, R. THULL:
Das Ossifikationsprinzip des Schild-
knorpels.
Verh. Dtsch. Ges. Path. 64 (1981 im Druck)
- PLIESS, G.: Bewegungsapparat.
In: Organpathologie, Doerr, W. (ed.)
Bd. III, Stuttgart 1974
- ROHEN, J.: Funktionelle Anatomie des Menschen.
Stuttgart 1975
- RONCALLO, P.: Researches about ossification and con-
formation of the thyroid cartilage in men.
Acta Otolaryng. 36, 110-134 (1948)
- SCHEIER, M.: Über die Ossifikation des Kehlkopfs.
Arch. Mikr. Anat. 59, 220-258 (1910)
- SCHNEIDER, R.: Der Larynx der Säugetiere.
In: Kükenthal-Krumbach (eds.), Handbuch
der Zoologie Bd. 8, 1-128 (1963)
- SIGWART, H.: Werkstoffkunde.
In: Dubbel, Taschenbuch für den Maschinen-
bau; Sass F., Bouche C., Leitner A. (eds.)
Bd. I, Berlin 1974
- STEPHAN, M., W.v. GLASS, H.-J. PESCH, R. THULL:
Das Ossifikationsmuster des Schildknorpels.
Persönliche Mitteilung, 1981

Danksagung

Herrn Prof. Dr. med. Volker Becker, Direktor des Pathologischen Instituts der Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich für die freundliche Unterstützung bei meinen Untersuchungen im Pathologischen Institut.

Herrn Prof. Dr. med. Hans-Jürgen Pesch, Oberarzt des Pathologischen Instituts der Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich sehr herzlich für die Überlassung des Themas und die vielen Anregungen.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. R. Thull, Institut für Biomedizinische Technik der Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich für die tatkräftige Hilfe bei meinen experimentellen Untersuchungen.

Die röntgenologischen und experimentellen Untersuchungen wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (Sonderforschungsbereich 118) unterstützt.

Lebenslauf

Am 13.7.1955 wurde ich als jüngstes von drei Kindern des Arztes Dr. Ludwig von Glaß und seiner Ehefrau Gertraud, geborene Thiem, in Nürnberg geboren.

Nach der Grundschule besuchte ich das Neue Gymnasium Nürnberg, wo ich 1974 das Abitur ablegte.

Von Juli 1974 bis April 1975 leistete ich Wehrdienst.

Im Sommersemester 1975 begann ich an der Universität Erlangen Medizin zu studieren. Im April 1981 beendete ich mein Studium erfolgreich und erhielt am 30.4.1981 die Approbation als Arzt.

Am 1.8.1981 beginne ich eine Tätigkeit als Assistenzarzt am Pathologischen Institut der Universität Erlangen-Nürnberg als Vorbereitungszeit für eine operative Weiterbildung.

Ich bin unverheiratet.

